

文章编号: 1001-3806(2017)06-0909-07

45[#]钢光纤激光毛化数值模拟及实验研究

符永宏, 李 进, 符 昊, 张航成, 潘彩云
(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了在模具上加工出特定的毛化形貌和尺寸,采用计算流体力学软件 Fluent 探究形貌成型机理,建立了激光毛化过程 3 维瞬态模型。考虑热传导、热对流、材料热物性参量等影响因素,采用焓法处理固液相变移动边界,通过用户自定义函数加载激光热源,计算得出熔池温度场与流场。基于数值模拟,采用单因素轮换法进行了毛化工艺试验,研究了激光功率密度、脉宽两因素对毛化形貌、几何参量的影响。结果表明,激光功率密度在 $2.04 \times 10^4 \text{ W/mm}^2 \sim 3.57 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$,脉宽在 $100 \mu\text{s} \sim 1000 \mu\text{s}$ 之间;以氮气作为辅助气体,可获得球冠状、凹顶球冠状、M 状 3 种形貌。该结果对模具毛化种类具有指导意义。

关键词: 激光技术; 激光毛化; 计算流体力学; 温度场; 流场

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.06.028

Numerical simulation and experimental study about fiber laser texture on 45[#] steel

FU Yonghong, LI Jin, FU Hao, ZHANG Hangcheng, PAN Caiyun

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to fabricate specific morphology and size on a mold by means of the laser texture, and explore the mechanism of the formation of topography, a three-dimensional transient model of the laser texturing process was established based on the Fluent software. The temperature field and flow field of molten pool were calculated, and the experimental parameters were determined: laser power density $2.04 \times 10^4 \text{ W/mm}^2 \sim 3.57 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$, pulse width $100 \mu\text{s} \sim 1000 \mu\text{s}$. The thermal conductivity, thermal convection, thermophysical properties of materials and other factors were considered. The enthalpy method was used to deal with the boundary of solid-liquid phase transition, the laser heat source was loaded through user defined function. Based on numerical simulation, the influence of laser power density and pulse width on the morphologies and geometrical parameters of laser texturing were studied by varying a single factor with nitrogen gas as the auxiliary gas. Spherical crown, concave crown and M shape were obtained. The results have guiding significance for mold texturing.

Key words: laser technique; laser texturing; computational fluid dynamics; temperature field; flow field

引 言

摩擦副之间的表面形貌决定了零件的摩擦学特性^[1]。通过激光毛化技术来优化摩擦副表面间的微观形貌,改善润滑效果,提高抗磨损能力及使用寿命。随着激光毛化技术的发展,激光毛化技术以其加工质量好、可控性强、加工热变形小等优点成为近几年的研究热点。该技术被广泛应用于轧辊^[2-6]、磁盘^[7]等行业,目前正探索用于刀具^[8]行业。

激光毛化是用高能量密度激光束辐照材料表面,让表面材料瞬间熔化,并带有少许气化,在材料自冷作用下迅速冷却,以达到改形改性目的,从而改善工作表面的摩擦情况,提高零部件抗磨损能力及使用寿命^[9]。

国外学者 DU^[10]等人使用 YAG 激光器,在轧辊表面研究激光输入功率、脉宽等加工参量对毛化形貌影响规律,最终加工出凸起高度 $3 \mu\text{m}$ 、凸起直径 $250 \mu\text{m}$ 左右微凸体形貌,并对毛化轧辊进行平整轧制试验,效果良好。LIU^[11]等人研究了表面粗糙度对 GCr15 钢毛化影响,发现粗糙表面上毛化形貌虽比镜面毛化形貌略高,但其显微硬度和耐磨性降低,所以从工程应用考虑,靶材表面粗糙度一般在 $0.4 \mu\text{m}$ 及其以下为宜。VILHENA 等人^[12]在 100Cr6 钢上,分别使用多模和单模激光模式探究了脉冲能量和脉冲个数对形貌的影响

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375211; 51305168);江苏省工业支撑基金资助项目(BE2014115)

作者简介:符永宏(1965-),男,教授,博士生导师,主要从事润滑及激光应用技术的研究。

E-mail:fyh@ujs.edu.cn

收稿日期:2016-12-23;收到修改稿日期:2017-03-01

规律。MI^[13]等人使用 YAG 激光器探究了模具表面毛化工艺,考虑了抽运电压、吹气压力等工艺参量对毛化形貌的影响规律,检测并发现,毛化点硬度相对基材提高了 30%~40%。

为了探究激光毛化成型机理,同时为了减少试验研究工作量,国内外学者通过数值模拟探究激光毛化。CHILAMAKURI 等人^[14]在前人的基础上,通过计算机模拟出磁盘中 W 形状激光毛化点,并探究了不同数目毛化点等参量对屈服应力的影响。XU^[15]等人基于 COMSOL 计算平台探究了表面张力梯度的正负及大小对熔池的影响。VORA^[16]等人基于 COMSOL 软件,使用多步计算模型研究多种单脉冲激光能量密度和相关的物理现象对温度变化过程、形貌等的影响。因为毛化形貌可控是激光毛化能够工程应用的前提条件,且由于不同用途,在不同材料上对毛化点形貌和尺寸要求不同,因此进行激光毛化工艺及理论探究,显得尤为重要。

为得到不同种类毛化形貌的工艺参量,作者以 45# 钢为研究对象,使用光钎激光器进行激光毛化工艺试验。首先通过数值模拟激光毛化过程,探究毛化形貌成型机理,在模拟结果基础上,确定工艺试验参量范围。然后通过试验研究激光功率密度、激光脉宽和辅助气体 3 个参量对毛化形貌的影响规律。最终确定了不同毛化形貌的加工参量,并对各形貌的成型机理进行了解释。

1 毛化形貌几何表征

图 1 中展示了 4 种形貌:球冠状、凹顶球冠状、M 状、火山口状。 D_1, D_2 分别为形貌内径、外径, H_1, H_2 分别为形貌高度、深度。球冠状形貌中心凸起,四周略有凹陷;凹顶球冠状与球冠状相似,不同之处在于形貌顶部有小凹坑。内径 D_1 为凹陷最低处之间的距离,外径 D_2 为凹陷外围直径。M 状形貌中心凹陷,凹陷深度在表面上下 $1\mu\text{m}$ 左右,四周凸起,形如字母 M;火山口状中部为凹坑,凹坑四周凸起。以工件表面为基线,基线经过凸起内部两点之间的距离为内径 D_1 ,经过凸起外部两点之间的距离为外径 D_2 。 H_1 为基线到形貌

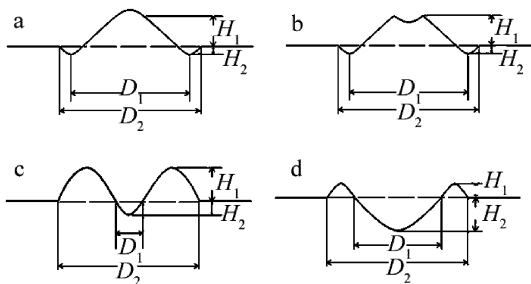


Fig. 1 Morphology characterization

a—spherical crown b—concave crown c—M shape d—crater

最高处距离, H_2 为基线到形貌最深处距离。下面所提直径均默认为外径 D_2 。

2 数值模拟

2.1 物理模型

综合考虑计算精度和计算时间,模型网格划分时在激光辐照区及其附近区域进行加密,在较远区域采用较粗网格。计算几何模型尺寸为 $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 0.25\text{mm}$,在多次计算中最外层的热影响区并没有超出这个尺寸,所以这样的缩小尺寸是可行的。计算几何模型见图 2。

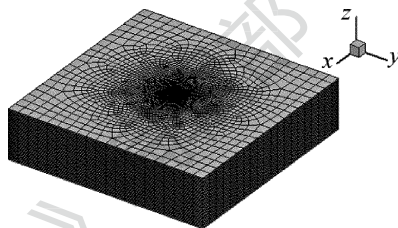


Fig. 2 Geometric model

2.2 控制方程

整个模拟过程满足质量、动量、能量守恒定律,其基本控制方程如下。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中, ρ 是密度; t 是时间; u, v 和 ω 是速度矢量 μ 在 x, y, z 方向的分量。

动量方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mu) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mu) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega \mu) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{cases} \quad (2)$$

式中, div 表求散度计算方式; p 是微元体上的压力; τ_{xx}, τ_{xy} 和 τ_{xz} 等是因分子粘性作用而产生的作用在微元体表面上的粘性应力 τ 的分量; F_x, F_y 和 F_z 是微元体上的体积力。本文中, z 轴竖直向上,所以 $F_x = 0, F_y = 0, F_z = -\rho g, g$ 表示重力加速度。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mu T) = \text{div}\left(\frac{\kappa}{c_p} \text{grad} T + \Delta H\right) \quad (3)$$

式中, grad 表阶度计算方式, c_p 是比热容, T 为温度, κ 为传热系数, ΔH 为熔化相变潜热。

2.3 边界条件

为准确描述激光毛化过程,考虑试样表面通过对

流和辐射换热向周围环境散失能量。总热流密度为：

$$q = q_c + q_r = h(T_e - T_0) + a_r(T_e - T_0) \quad (4)$$

$$q_c = h(T_e - T_0) \quad (5)$$

$$q_r = a_r(T_e - T_0) \quad (6)$$

式中, q_c, q_r 分别为对流换热热流密度、辐射换热热流密度, h 为表面对流换热系数; a_r 为表面辐射换热系数; T_e 和 T_0 分别为试样表面温度和环境温度。

试样初始温度等于环境温度 T_0 ：

$$T(x, y, z, 0) = T_0 = 20^\circ\text{C} \quad (7)$$

2.4 热源

金属对激光吸收发生在表层很薄的范围内, 因此

模拟过程中将激光热源当成表面热源。试验中所用激光器的激光光强空间为高斯分布, 时间为矩形分布, 因此模拟参量设置相同。激光功率密度为：

$$I(x, y) = P \exp\left(-2 \frac{x^2 + y^2}{w^2}\right) \quad (8)$$

式中, P 为激光功率, w 为光斑直径(50 μm)。

2.5 材料热物性参量

45#钢的热物性参量如密度、比热容、导热系数等随温度变化而变化。因此根据表1中给出的已知温度处的参量, 通过插值法和外推法确定未知温度处的值。

材料密度 7840 kg/m^3 , 熔点 1495 $^\circ\text{C}$ 。融化潜热取为

Table 1 Specific heat and heat conductivity of 45# steel

$T/^\circ\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600	700	755	800	900	1000
$c_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	472	480	498	524	560	615	700	854	1064	806	637	602
$\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	47	43.53	40.44	38.13	36.02	34.16	31.98	28.66	25.14	26.49	25.92	24.02

260000 J/kg 。

2.6 其它设置

金属表面吸收激光能量并向内部传递, 温度逐渐达到熔点以上发生熔化, 此时存在液相区、糊状区和固相区。本文中采用焓-多孔介质方法处理固液相变移动边界。考虑金属融化后的自然对流和 Marangoni 对流。

3 计算结果与讨论

部分金属吸收足够多的激光能量, 温度会达到熔点以上气化点以下, 形成金属液体, 由于表面张力在液体界面起作用, 引起表面张力梯度, 使液体流动, 称之为 Marangoni 对流。Marangoni 对流存在于金属液体

中, 且 Marangoni 对流方向与表面张力梯度 $\partial\sigma/\partial T$ (σ 是表面张力, T 是温度) 的正负相关, 大多数纯金属液体 $\partial\sigma/\partial T < 0$, 即金属从熔池中心流向四周, 某些活性元素, 比如元素 S 能改变 $\partial\sigma/\partial T$ 的正负。45#钢含硫量在 0.03% 左右, 所以 $\partial\sigma/\partial T > 0$ ^[10], 即金属液体从熔池四周流向中心。在重力作用下, 由温度梯度导致的密度差, 衍生出与 Marangoni 对流方向相反的自然对流。但是自然对流的流速在 mm/s 量级, Marangoni 对流的流速在 m/s 量级, 所以 Marangoni 对流是熔池中对流的主要形式。在两种对流共同最用下, 形成如图3中的熔池温度场、速度场, 熔融金属从边缘流向中心, 形成球冠状凸起形貌。激光功率密度为 $2.55 \times 10^4 \text{W}/\text{mm}^2$ 、脉宽为 500 μs 的温度场和流场如图3所示。

激光作用时间增多, 或激光功率密度增大, 都会导致金属吸收能量增多, 在热传导和热对流作用下金属熔化体积增多, 熔池直径和深度都增大, 在熔池对流作用下堆积形成的凸起形貌体积也就增大, 宏观上表现为凸起直径与高度随脉宽、功率密度增加而变大, 数值计算与试验结果基本一致, 证明了计算的准确性。

脉宽 500 μs , 不同激光功率密度下熔池对流速度变化情况如图4所示。从图中可知, 同一激光功率密度下, 金属液体流动速度在前 200 μs 急剧增加, 在 200 μs 之后只是略微增加。而对流速度出现先急剧增加后趋于平缓, 是因为 Marangoni 对流是熔池中对流的主要形式, 其驱动力是由熔池温度梯度衍生出的表面张力梯度, 在加热前期(前 200 μs), 温度梯度逐渐增大, 导致液体流速也在增加; 200 μs 之后, 虽说同样处于急热过程, 但此时相对前 200 μs , 因为热传导和热对流作用, 熔池内温度分布趋于平缓, 所以温度梯度降低, 表面张力梯度随之降低, 最终表现为液体流动速度

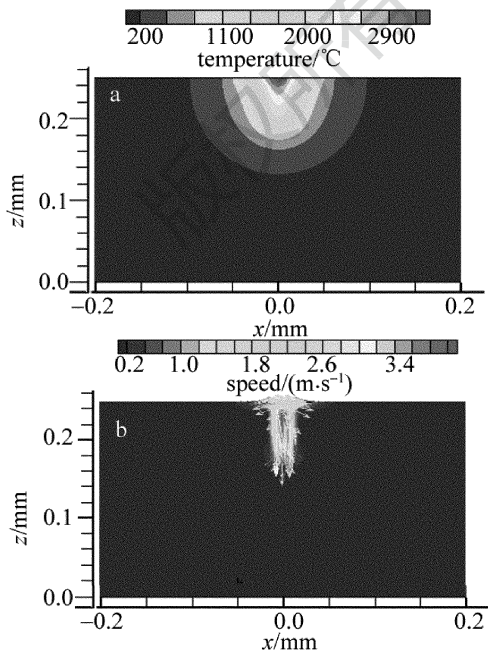


Fig. 3 Temperature field and flow field of laser power density $2.55 \times 10^4 \text{W}/\text{mm}^2$ and pulse width 500 μs
a—temperature field b—flow field

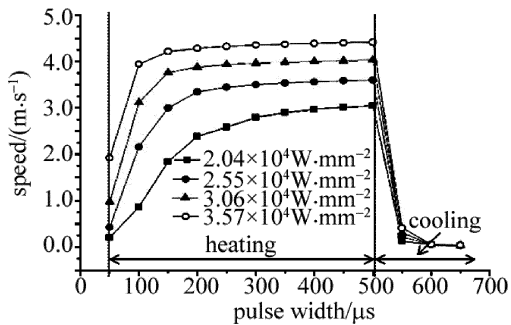


Fig. 4 Relationship between the maximum speed and pulse width with various laser power densities

变得平缓。

激光功率密度为 $2.04 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$ 、金属达到熔化温度 1495°C 以上的直径和深度随脉宽的变化情况如图 5 所示。融化体积随着脉宽增加而增加。熔池直径变化率基本保持不变,熔池深度变化率是先增加,后减小。这与熔池对流方向和对流速度相关。如图 3b 所示,四周金属流向中心之后,促成对流方向向下,靠近熔池表面金属液体携带热量流向底部,促进熔深加大。对流速度越快,单位时间内从熔池表面到达底部的热量越多,熔深增加的越快;当对流速度变化趋于平缓,单位时间内到达底部的热量也是趋于平缓,所以熔深变化率在 $400 \mu\text{s}$ 以后减小。

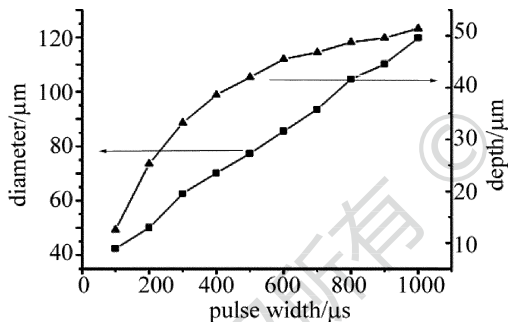


Fig. 5 Relationship of diameter, depth and pulse width with the temperature above 1495°C

由此分析可见,图 3 中的中心最高温度为 3287°C ,超过了沸点 2750°C ,说明熔池中心存在部分材料气化,后面的试验中,在 $500 \mu\text{s}$ 及其以后出现的凹顶球冠状形貌也证明了计算的准确性。

数值模拟有助于激光毛化工艺优化,通过数值计算发现,激光功率密度低于 $2.04 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$,因能量较小,熔融金属太少,金属表面基本无变化;激光功率密度高于 $3.57 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$,因能量较大,达到气化温度以上金属太多,所成形貌并非本工程应用需要。所以将试验激光功率密度范围限定为 $2.04 \times 10^4 \text{ W/mm}^2 \sim 3.57 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$,脉宽最大限定为 $1000 \mu\text{s}$ 。在此方案下,将较好形貌选出,用相同激光参量配以辅助气体进行进一步形貌探索。

4 试验研究

4.1 试样和试验设备

试样材料为 45# 钢,待加工表面经过砂纸打磨后粗糙度 $R_a \approx 0.1 \mu\text{m}$ 。

激光毛化采用 SP-100C-A-S6-A-A 型光纤激光器,光斑直径不大于 0.5 mm ;毛化形貌检测设备采用德国 Nanofocus 公司所生产的研究级共聚焦显微镜。

4.2 试验方案

激光功率密度和脉冲宽度两个主要因素采用单因素轮换法进行试验。离焦量固定为 0 mm ,依次改变激光功率密度为 $2.04 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$, $2.55 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$, $3.06 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$, $3.57 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$,激光脉宽分别为 $100 \mu\text{s}$, $300 \mu\text{s}$, $500 \mu\text{s}$, $700 \mu\text{s}$, $900 \mu\text{s}$, $1000 \mu\text{s}$,并加做两组对比试验,即在 $2.55 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$ 和 $3.06 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$ 情况下吹 N_2 ,吹气角度垂直于加工面,吹气压力 0.2 MPa 。加工之后采用 Nanofocus 公司生产的研究级共聚焦显微镜对毛化形貌进行测量。

5 试验结果与分析

在无辅助气体情况下,加工出球冠状、凹顶球冠状。

经过初步试验,发现激光功率密度在 $2.55 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$ 和 $3.06 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$ 两者下,形成较好的球冠状形貌。遂在这两组参量下,加以辅助 0.2 MPa 的氮气,垂直吹射,进一步探索毛化形貌,加工出 M 状形貌。

5.1 球冠状与凹顶球冠状形貌变化规律

如图 6 所示,在无辅助气体情况下,固定激光功率密度,在脉宽 $100 \mu\text{s} \sim 300 \mu\text{s}$ 内加工出球冠状形貌,在脉宽 $500 \mu\text{s} \sim 1000 \mu\text{s}$ 内加工出凹顶球冠状形貌。

两种形貌直径及高度变化规律如图 7 所示。形貌高度、直径都随着激光功率密度及脉宽的增加而增加,金属吸收能量达到熔化点以上时体积增大,可供堆积金属增多,所以宏观上表现为直径和高度增大。这与计算结果相一致,验证了计算的正确性。

因为试验中所用光纤激光器激光模式为高斯模,光斑中心位置的金属温度相比四周要高很多,且在脉宽不小于 $500 \mu\text{s}$ 情况下率先达到气化温度以上,此试验现象和数值计算结果吻合。气化材料离开熔池表面,产生反冲压力^[17],反冲压力导致球冠状表面凹陷,其原理如图 8 所示。所以在 $500 \mu\text{s}$ 开始出现凹顶球冠状,且随着脉宽增加,达到气化点以上的金属体积也在增加,反冲压力变大,导致球冠上的凹顶增大。

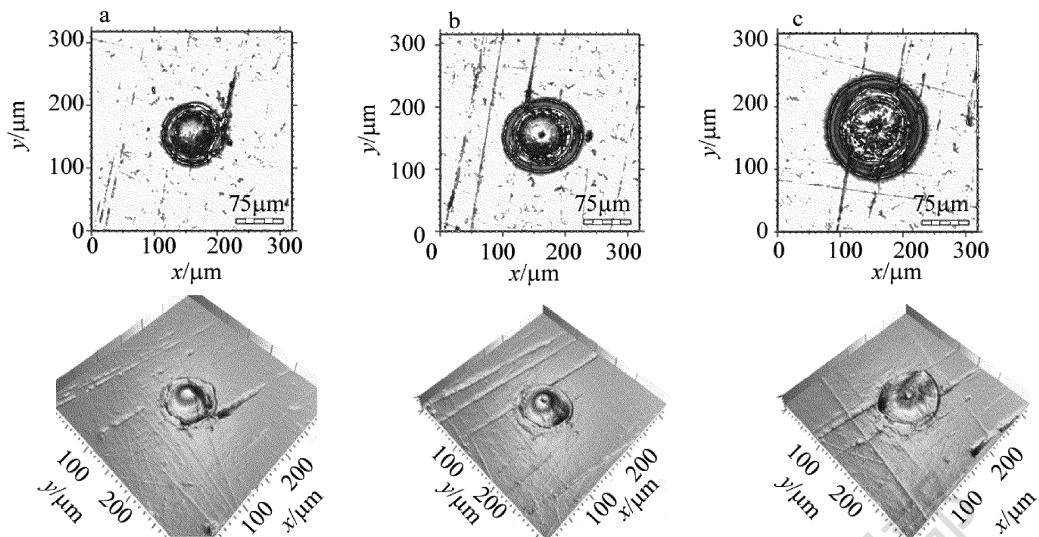


Fig. 6 Picture and 3-D shape of laser texturing with different pulse widths under laser power density of $2.55 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$
a— $300 \mu\text{s}$ b— $500 \mu\text{s}$ c— $1000 \mu\text{s}$

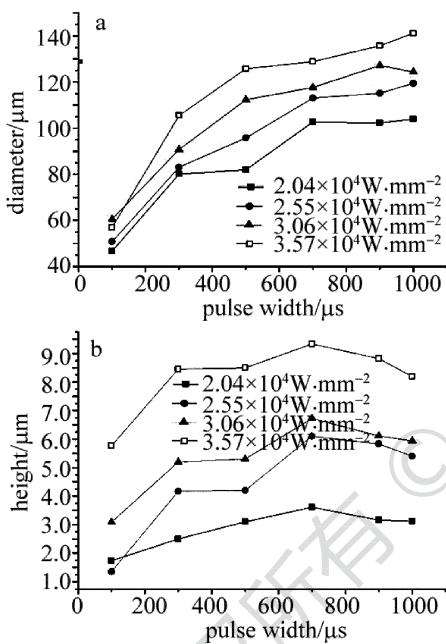


Fig. 7 Morphology without auxiliary gas

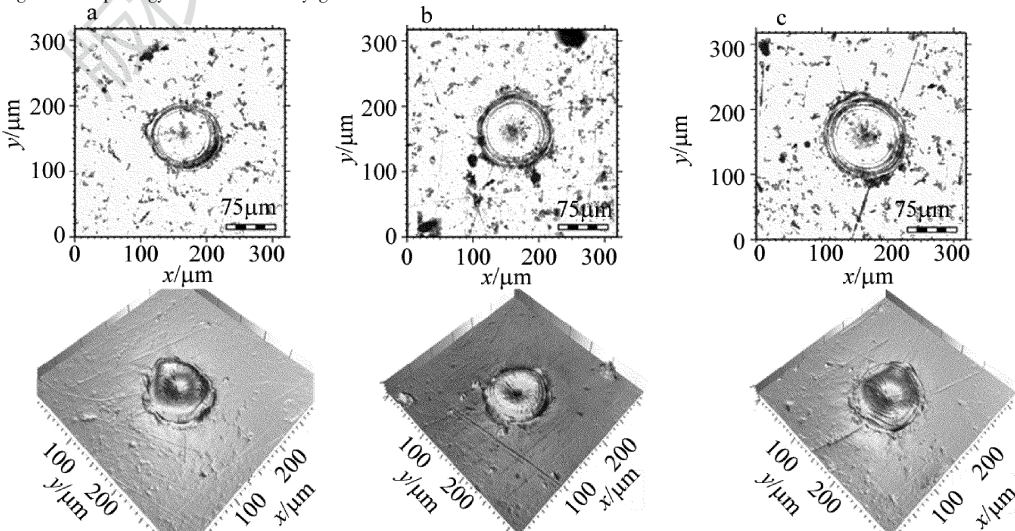


Fig. 9 Picture and 3-D shape of laser texturing with different pulse widths under laser power density of $2.55 \times 10^4 \text{ W/mm}^2$ and nitrogen pressure 0.2MPa
a— $500 \mu\text{s}$ b— $700 \mu\text{s}$ c— $1000 \mu\text{s}$

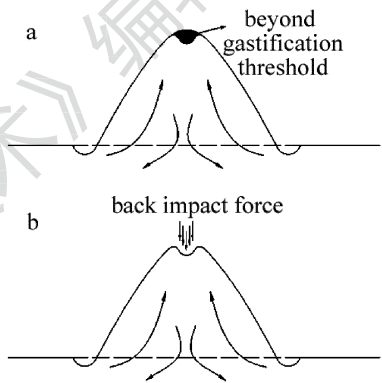


Fig. 8 Schematic diagram of concave crown

从整体上看,形貌直径在脉宽 $500 \mu\text{s}$ 以后增大率变小,形貌高度在脉宽 $700 \mu\text{s}$ 之后略有减小。原因是脉宽不小于 $500 \mu\text{s}$ 、光斑中心达到气化温度以上的金属增多,气化金属继续吸收激光能量,进而形成等离子体,等离子体对入射激光有衰减作用,且能量越大,等离子体密度越大,其对激光吸收率越大^[18],这导致实

际到达金属表面能量没有增大,所以熔融金属相对减少,可供堆积金属减少,形貌直径增大率表现为下降,形貌高度表现为降低。

5.2 M 状形貌变化规律

在吹气情况下,采用不同激光加工参量加工出 M 状形貌,如图 9 所示。出现这种形貌是因为气体力的作用,如图 10 所示。实验中气体从喷嘴出来之后,并非成圆柱式的气柱,而是成伞状的散射气柱。外围气体扩散成为低压区,气柱中心的气压最接近喷嘴出口气压。所以形貌中心作用力大,外围作用力小。熔池对流结合气压分布,最终形成了 M 状形貌。

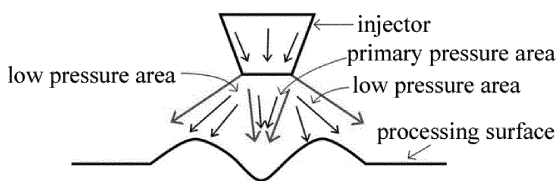


Fig. 10 Schematic diagram of gas jet

图 11a 为相同激光加工参量下,无辅助气体与有辅助气体(0.2MPa 氮气压力)情况下形貌直径变化图,两者都是随着脉宽的增大而增大。但是吹气形成的直径数值大于未吹气工况下的数值,因为加以垂直 N₂,熔池热量在气体流动下,向四周扩散加速,导致融化金属增多,宏观上表现为形貌直径增加。图 11b 显示,有辅助气体工况下的形貌高度低于无辅助气体下的高度,因为垂直吹出的气体对加工表面有一个垂直向下的作用力,这样会导致熔融金属堆积困难,所以高度变低。

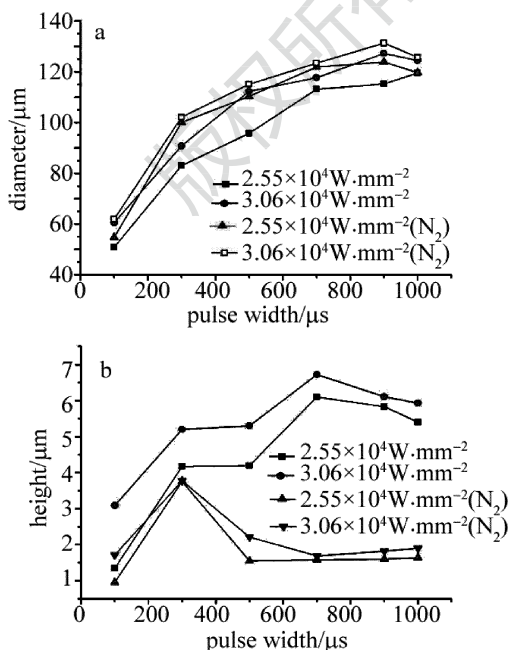


Fig. 11 Morphology within auxiliary gas

6 结论

通过数值模拟确定出试验参量范围,减少试验工作量。通过试验探索,获得了球冠状、凹顶球冠状、M 状微凸体毛化形貌,结果证明,数值模拟与试验结果相符,并通过分析试验结果与模拟结果,得出了激光功率密度、脉宽、吹气对毛化形貌、尺寸的影响规律。

(1)数值模拟计算出了熔池温度场和流场,流场预示熔融金属向中心堆积形成凸起形貌,温度场数据预示在脉宽不小于 500 μs 情况下,熔池中心有部分材料气化,球冠状、凹顶球冠状形貌验证了模拟结果。计算结果为下一步试验确定了激光功率密度范围:2.04 × 10⁴ W/mm² ~ 3.57 × 10⁴ W/mm²,脉宽范围:100 μs ~ 1000 μs。

(2)无辅助气体。固定激光功率密度,在脉宽 100 μs ~ 300 μs 时,熔池在自然对流和 Marangoni 对流共同作用下堆积成球冠状形貌;在脉宽 500 μs ~ 1000 μs 时,由于光斑中心部分材料蒸发导致材料去除和由蒸发产生的反冲压力,在球冠状形貌基础上形成凹顶球冠状。

(3)有辅助气体。在 2.55 × 10⁴ W/mm² 和 3.06 × 10⁴ W/mm² 激光功率密度下,通过垂直气体的作用,形成 M 状形貌。相同激光参量下,M 状形貌直径大于球冠状,而高度低于球冠状。

通过调整激光参量和配以辅助气体,基本可以实现具体加工参量对应具体毛化形貌及尺寸。

参 考 文 献

- [1] WAN T, LI J L. Effect of laser-texturing morphology on tribological performance of face seal pairs[J]. Laser Technology, 2015, 39(4): 506-509 (in Chinese).
- [2] ZHANG R H, HAN Sh, LIANG H J. Study on fiber laser surface texturing technology for the roller[J]. Applied Laser, 2011, 31(6): 451-455 (in Chinese).
- [3] SHEN H, CHEN G N, LI G C. The plastic instability behavior of laser textured steel sheet [J]. Materials Science and Engineering, 1996, A219(1/2): 156-161.
- [4] HE Y F, DU D, LIU Y. Laser texturing of rolled surfaces[J]. Journal of Qinghua (Science and Technology Edition), 2003, 8(2): 236-240.
- [5] WAN D P, LIU H B, WANG Y M. CO₂ laser beam modulating for surface texturing machining [J]. Optics & Laser Technology, 2008, 40(12): 308-314.
- [6] ZHANG J Y, XU Sh M, SUN D Y. Performance research of thermal shock resistance of laser remelting thermal barrier coating on roll surface[J]. Laser Technology, 2015, 39(4): 552-556 (in Chinese).
- [7] DUAN J. Present and future development of laser microprocessing on disk substrate-laser texture [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 490-493 (in Chinese).
- [8] FU Y H, GU Y L, KANG Zh Y. Experimental research of laser texturing of cemented carbide[J]. Laser Technology, 2016, 40(4): 512-

- 515 (in Chinese).
- [9] LIN Z G. Laser texturing and design of tribology[J]. *Journal of Machine Design*, 2000, 17(4): 24-27(in Chinese).
- [10] DU D, HE Y F, SUI B, *et al.* Laser texturing of rollers by pulsed Nd: YAG laser [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 161(3): 456-461.
- [11] LIU Y, CHEN D R, HE Y F. Effect of surface roughness of steel on morphology of laser-textured micro-convex [J]. *Tribology*, 2002, 22(6): 477-480(in Chinese).
- [12] VILHENA L M, SEDLAČEK M, PODGORNIK B, *et al.* Surface texturing by pulsed Nd: YAG laser [J]. *Tribology International*, 2009, 42(10): 1496-1504.
- [13] MI T, LI C D, NI J, *et al.* Laser texturing of spherical cap slight protuberance profile on mould and die surface[J]. *Laser Technology*, 2009, 33(5): 500-502(in Chinese).
- [14] CHILAMAKURI S, BHUSHAN B. Effect of peak radius on design of W-type donut shaped laser textured surfaces[J]. *Wear*, 1999, 230(2): 118-123.
- [15] XU B Q, WANG H, XU G D, *et al.* Numerical modeling of laser-induced molten pool for laser interaction with metal material[J]. *Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition)*, 2010, 31(3): 358-362(in Chinese).
- [16] VORA H D, SANTHANAKRISHNAN S, HARIMKAR S P, *et al.* Evolution of surface topography in one-dimensional laser machining of structural alumina[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2012, 32(16): 4205-4218.
- [17] VOLLER V R, PRAKASH C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1987, 30(8): 1709-1719.
- [18] FU Y H, LIU Q X, YE Y X, *et al.* Research on laser surface micro texturing processing of single pulse intervals[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(12): 1203005(in Chinese).